

УДК 621.891:669.018.44

**Д-р техн. наук Л. И. Ищенко, канд. техн. наук В. В. Цыганов,  
д-р техн. наук А. Я. Качан**

*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА ХТН-61 ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И СЛОЖНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

*Рассмотрена износостойкость сплава ХТН-61 при трении в условиях сложного динамического нагружения и отрицательных температур. Показана возможность определения интенсивности изнашивания сплава с учетом особенностей формирования поверхностного слоя при контактировании. На основании оценки изменения прочностных и деформационных свойств поверхности образцов отмечена взаимосвязь состояния поверхностного слоя и износостойкости контактирующих поверхностей.*

**Ключевые слова:** износ, износостойкость, поверхностный слой, сплав ХТН-61.

### **Введение и проблематика вопроса**

Многие трибосопряжения, в том числе и авиационные ГТД, работают в условиях сложного динамического нагружения и отрицательной температуры окружающей среды. В частности, основными факторами, затрудняющими запуск ГТД в полете, являются низкая температура и давление в камере сгорания (почти равные температуре и давлению воздуха), поэтому, чем больше высота полета, тем сложнее условия запуска. Кроме того, на трибосопряжения влияют пониженные (до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) климатические температуры у земной поверхности. Наиболее опасным является сочетание низкой температуры с высокой влажностью [1]. При этом возникает комбинированное воздействие отрицательной температуры, свойств газовой среды и взаимного перемещения деталей с наличием вибраций, действующих в различных направлениях, в том числе присутствия ударной нагрузки. Без учета всего комплекса факторов нагружения при исследованиях износостойкости трибосопряжений происходит искажение результатов и создание картины процесса изнашивания мало отвечающей реальной.

В настоящее время одним из наиболее часто применяющихся износостойких материалов для деталей, которые эксплуатируются в экстремальных условиях, является сплав ХТН-61. Этот сплав имеет заэвтектическую структуру с первичными зернами карбида (Ti, Nb)C и эвтектикой  $\text{Co}+(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ , характеризуется двухфазностью. Высокая износостойкость этого сплава достигается равномерным распределением высокопрочной матричной фазы твердого раствора на основе кобальта, что позволяет, в частности, эффективно использовать его для напаяк на бандажные полки лопаток ГТД. Сложный химический состав сплава ХТН-61 предполагает всестороннее изу-

чение его износостойкости в условиях наиболее приближенных к эксплуатационным с учетом возможных колебаний температуры окружающей среды.

В общем случае физико-химическое взаимодействие твердых тел при контактировании характеризуется процессами деформирования поверхностей. Условия нагружения в большей степени определяют состояние поверхностного слоя и износостойкость контактирующих деталей, а температура окружающей среды, являющейся фактором, активизирующим диффузные процессы в зоне трения, влияет на показатели механической прочности. Периодический характер структурных изменений и вид зависимости между величиной деформации и числом циклов до разрушения свидетельствуют о природе разрушения аналогичной малоциклового усталости и концепции усталостной природы износа [2].

Однако, влияние отрицательных температур на износостойкость трибосопряжений неоднозначно. Связано это, прежде всего с тем, что не наблюдается общих закономерностей увеличения циклической прочности материалов при снижении температуры. Для одних металлов такое повышение может происходить во всем диапазоне низких температур, а для других рост сопротивления усталостному разрушению ограничивается определенными температурными интервалами, вне которых циклическая прочность остается постоянной или имеет тенденцию к уменьшению [3]. Такое различие в изменении свойств может наблюдаться у материалов одного класса, поэтому при изучении усталости в низкотемпературных условиях рекомендуется проводить испытания каждого исследуемого материала [4].

Неизбежно и различие в оценке влияния отрицательных температур на износостойкость ма-

териалов трибосопряжений, полученных различными авторами. Отмечается как увеличение интенсивности изнашивания при низких температурах [5], так и снижение [6], а авторы работы [7] приходят к выводу, что характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяется механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

Кроме того, необходимо учитывать также, что дополнительное нагружение однократной или периодической ударной нагрузкой может привести к собственным контактными колебаниям как в нормальном, так и в тангенциальном направлениях. Это, в свою очередь, способствует снижению силы трения, которое и отмечалось в ряде работ [8, 9]. При ударе может осуществляться деформирование материала как в контактной зоне с изменением состояния поверхностного слоя, так и в объеме.

**Методики исследований**

Для возможности проведения комплексных исследований износостойкости подобных трибосопряжений были разработаны специальные устройства и методики испытаний, которые позволяют реализовать условия различных видов сложного нагружения при трении с отрицательными температурами окружающей среды [10]. При этом появляется возможность получать и изучать функциональные зависимости фрикционно-износных характеристик материалов пары, осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар, производить физическое моделирование процессов в реальных трибосопряжениях. В результате, используя современные методы исследования [11], можно определить связь износостойкости поверхностей трения при конкретных термодинамических режимах и структурного состояния поверхностного слоя.

В данной работе представлены результаты исследований износостойкости образцов из сплава ХТН-61 в условиях трения с возвратно-поступательным скольжением (одномерное нагружение), ударе с проскальзыванием (двумерное нагружение), ударе с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (трехмерное нагружение) при нормальных условиях и с охлаждением до температур -60 °С. Нормальная удельная ударная нагрузка составляла от 0 до 0,6 Н/мм<sup>2</sup>, взаимное перемещение образцов в продольном направлении происходило с амплитудой 0,17 мм и частотой 66 Гц, в поперечном направлении — 0,05 мм и частотой 33 Гц, время испытаний — до 4 часов. Отрицательная температура при испытаниях достигалась за счет нагнетания паров жидкого азота в камеру узла задания температуры.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Из представленных результатов исследования сплава ХТН-61 при нормальной и отрицательной температурах (рис.1) следует, что износостойкость сплава в рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. Снижение объемной интенсивности изнашивания сплава при отрицательных температурах (-50 °С) происходит соответственно при одномерном нагружении в 1,95 раза, при двумерном нагружении — в 1,6 раза и при трехмерном нагружении — в 1,25 раза. Усложнение характера нагружения образцов при трении приводит к увеличению износа как при положительных, так и при отрицательных температурах. В частности, сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,05 мм (трехмерное нагружение) приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания в 2,5 раза при положительной температуре и в 3,2 раза при отрицательной температуре по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двумерном нагружении.

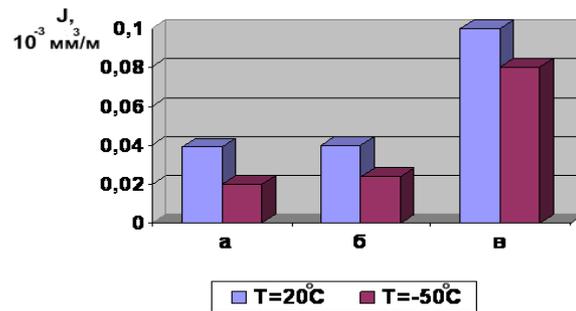


Рис. 1. Диаграмма изменения интенсивности изнашивания сплава ХТН-61 при различных видах нагружения: а – одномерное; б – двумерное; в – трехмерное

Для исключения влияния сложного характера нагружения на взаимосвязь отрицательной температуры и износостойкости сплава ХТН-61 были проведены дополнительные испытания при трении в условиях наиболее простого одномерного нагружения с различными температурами. Результаты исследований представлены на рисунке 2. Полученная зависимость указывает на то, что при одномерном нагружении с увеличением отрицательной температуры интенсивность изнашивания изменяется нелинейно. Можно предположить, что при температурах ниже минус 50 °С износостойкость сплава существенно не меняется и это характерно при рассматриваемых условиях сложного нагружения, учитывая отмеченное ранее уменьшение степени влияния отрицательной температуры на интенсивность изнашивания при повышении сложности характера нагружения.

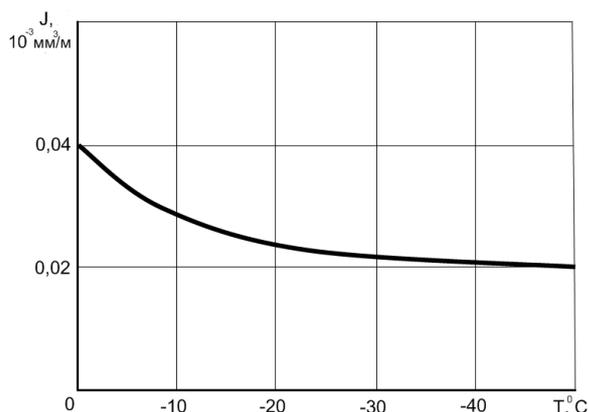


Рис. 2. Изменение интенсивности изнашивания сплава ХТН-61 при одномерном нагружении и различных температурах

Неравномерность влияния вида динамического контактного нагружения на изменение интенсивности изнашивания исследуемого сплава при отрицательных температурах указывает на сложный характер их взаимосвязи. Для рассмотрения физико-механических процессов при низкотемпературном трении необходима оценка и анализ модификации состояния поверхностного слоя. Как указывают авторы [7, 12], характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания определяются механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

Физико-механические свойства поверхностного слоя образцов определяли методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором на приборе «Микрон-гамма». Метод непрерывного вдавливания индентора, реализуемый на приборе «Микрон-гамма», основан на автоматической регистрации глубины внедрения в зависимости от приложенной нагрузки на индентор. Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности (тангенциальная составляющая силы трения индентора) с заданной нагрузкой. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа [13].

Оценку состояния поверхностного слоя образцов на приборе «Микрон-гамма» осуществляли с использованием программ для управления, сбора и обработки информации методом скани-

рования по методике Национального авиационного университета [13]. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор — 0,1 Н; скорость нагружения — 0,01 Н/с; скорость сканирования — 40 мкм/с.

Предварительно проведенные исследования образцов различных материалов при трении с нормальной температурой показали, что величина и распределение износа по контактной поверхности зависит от распределения нормальной динамической нагрузки. Сложный характер нагружения приводит к такому напряженному состоянию поверхностных слоев материала, которое инициирует повышенный износ. Изменение характера нагружения при трении приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения. Отмечен повышенный износ у сплавов с однородным равнопрочным поверхностным слоем, который характеризуется минимальным разбросом силы трения при сканировании индентором. При этом создаются условия для формирования фрагментов поверхностного слоя с относительно легким прохождением дислокаций через данные кристаллиты к их границам, что облегчает разрушение металла. Однако, степень влияния структурного состояния поверхностного слоя на износостойкость материала существенно зависит от химико-физических свойств материалов и условий трения. Для сплава ХТН-61 это влияние получено менее явно выраженным, что, возможно, является результатом большого расхода в прочности фрагментов поверхностного слоя, неоднородности сплава [9].

Результаты сканирования образцов двумя указанными выше методами после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения представлены на рисунках 3 и 4. Полученные данные состояния поверхностного слоя согласуются с экспериментами по оценке соотношения механических свойств, параметров структуры и износостойкости при нормальных условиях. Как следует из анализа трибограмм силы трения индентора, повышение сложности нагружения в трибосопряжении сопровождается уменьшением разброса силы трения при сканировании. Наименьший износ наблюдается при одномерном нагружении с образованием наиболее неравномерного поверхностного слоя (трибограмма 1). Трехмерное нагружение, которое сопровождается наибольшей величиной износа, приводит к выравниванию прочностных и деформационных свойств, повышению однородности равнопрочности поверхностного слоя (трибограмма 3). Причем, неизменный характер трибограмм при сканировании по всей глубине вдавливания (рис. 3) указывает на отсутствие существенного изменения прочностных и деформационных

свойств материала по глубине поверхностного слоя. Это позволяет пренебречь возможным влиянием на износостойкость незначительного азотирования поверхности, которое может возникнуть вследствие подачи в зону контакта паров жидкого азота.

Можно предположить, что отмеченная ранее нелинейность зависимости объемной интенсивности изнашивания при отрицательных температурах и различном характере динамического нагружения, связана с количеством дислокаций в поверхностном слое. При большой плотности



**Рис. 3.** Трибограммы силы трения при сканировании методом непрерывного вдавливания индентором образцов после трения с отрицательными температурами при различных видах нагружения:  
1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

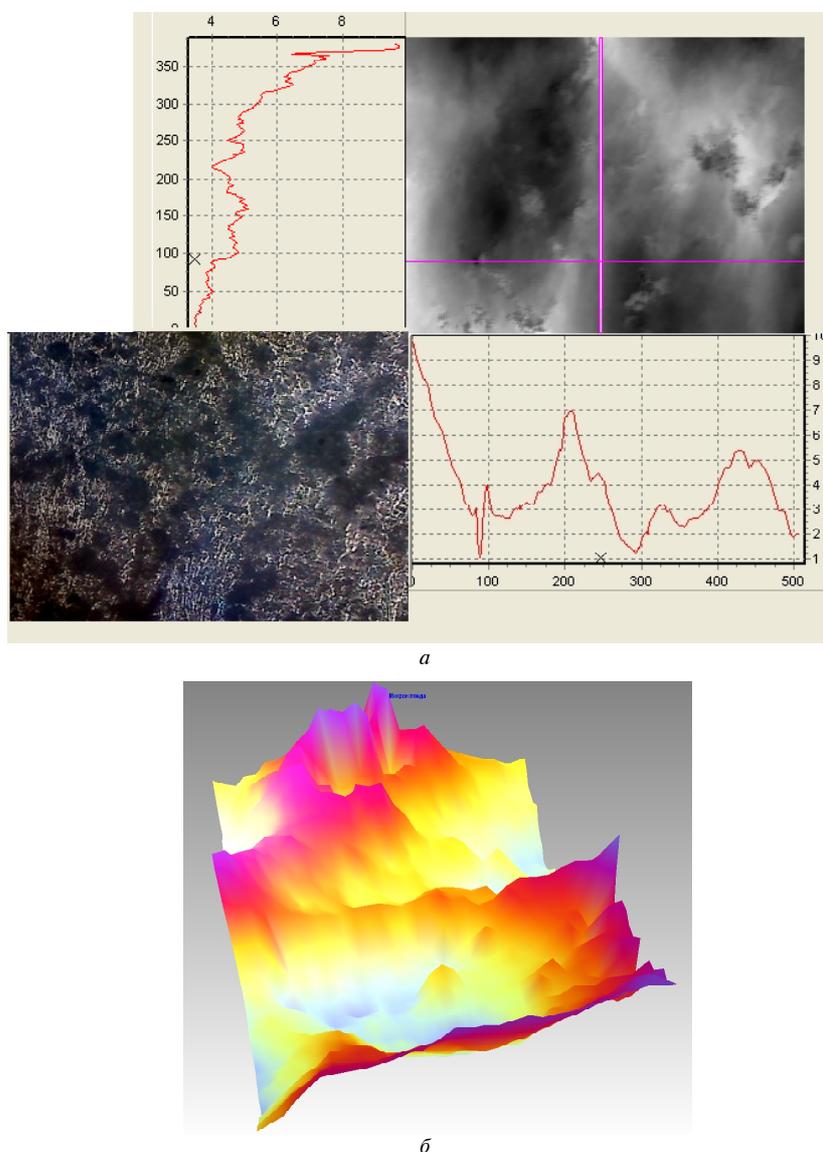


**Рис. 4.** Трибограммы силы трения при сканировании индентором с заданной нагрузкой образцов после трения с отрицательными температурами при различных видах нагружения:  
1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

дислокаций усиливается их взаимодействие, происходит закрепление, которое в свою очередь затрудняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих дефектов. Количество активных центров на поверхности перестает нарастать, достигнув насыщения, что сопровождается отсутствием изменения износостойкости при понижении температуры.

Физическая картина поверхностного разрушения анализируемого материала при трении в рассматриваемых условиях будет не полной без анализа изменений микрогеометрии получаемой поверхности. Изменение прочности и структурная однородность поверхностного слоя, получаемая при различных условиях трения, неизбежно приводит к изменению шероховатости контак-

тируемой поверхности. При изнашивании воспроизводится постоянная равновесная шероховатость, представляющая устойчивую систему, допускающую в данных условиях минимальную диссипацию энергии. Для установившегося процесса эта шероховатость соответствует минимальному значению сил трения при прочих неизменных условиях [2]. При рассмотрении трения как диссипативного процесса установлена связь между физико-механическими свойствами, теплофизическими характеристиками пары трения и шероховатостью приработанных поверхностей. Перестройка микрорельефа происходит путем избирательного разрушения энергетически перегруженных микронеровностей с сохранением тех из них, геометрические пара-



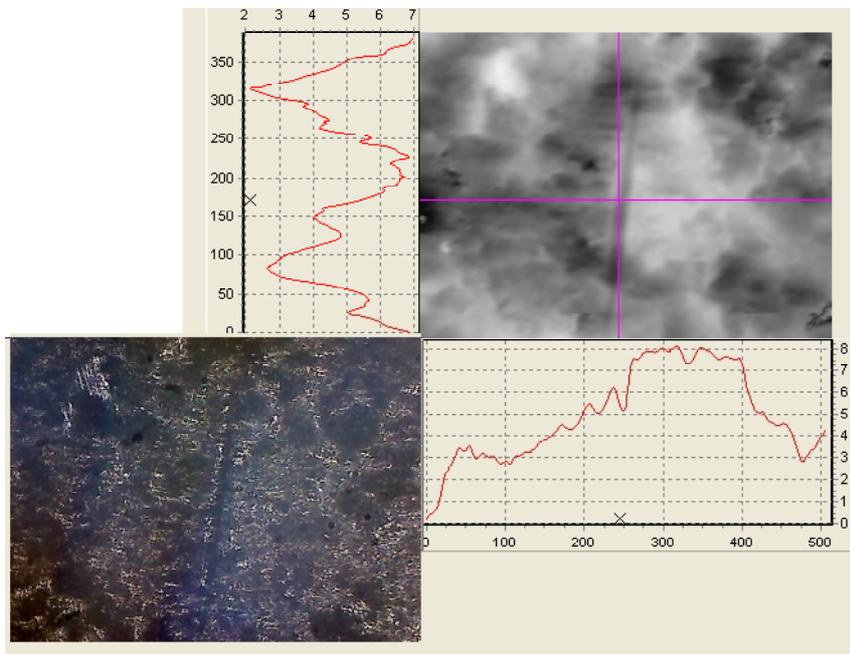
**Рис. 5.** Топография поверхности образца после износа с трехмерным нагружением при отрицательных температурах: *а* – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; *б* – 3D модель поверхности

метры которых обеспечивают минимум диссипации энергии [14].

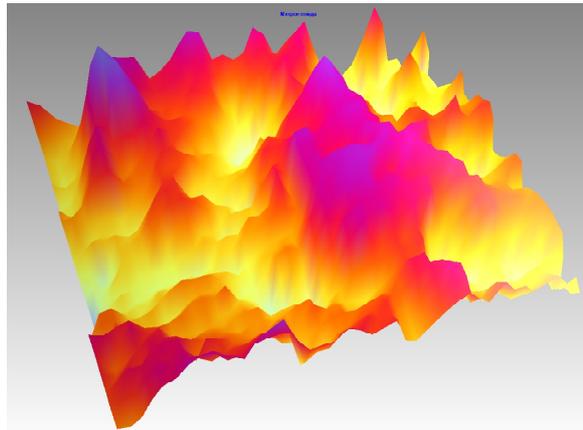
В связи с тем, что равновесная шероховатость может являться показателем состояния поверхностного слоя, однородности его прочностных и деформационных свойств, определяли топографию поверхности образцов на бесконтактном 3D профилографе «Микрон-альфа», разработанном в Национальном авиационном университете [15].

Как свидетельствуют результаты исследований, поверхность износа образцов, полученных в процессе трения с различным характером динамического нагружения при отрицательных температурах, отличается не существенно. Увеличе-

ние сложности нагружения при трении за счет наложения амплитуды поперечных проскальзываний и ударного нагружения сопровождается некоторым повышением однородности микрогеометрии поверхности, что связано с получением более однородного равнопрочного поверхностного слоя образцов. Однако, сплав ХТН-61 характеризуется двухфазностью с наличием матричной фазы, представляющей собой твердый раствор на основе кобальта, и второй фазы – кристаллов твердой карбидной фазы. Подобная сложная структура сплава способствует обеспечению его удовлетворительной износостойкости при трении с отрицательными температурами, но сопровож-



*a*



*б*

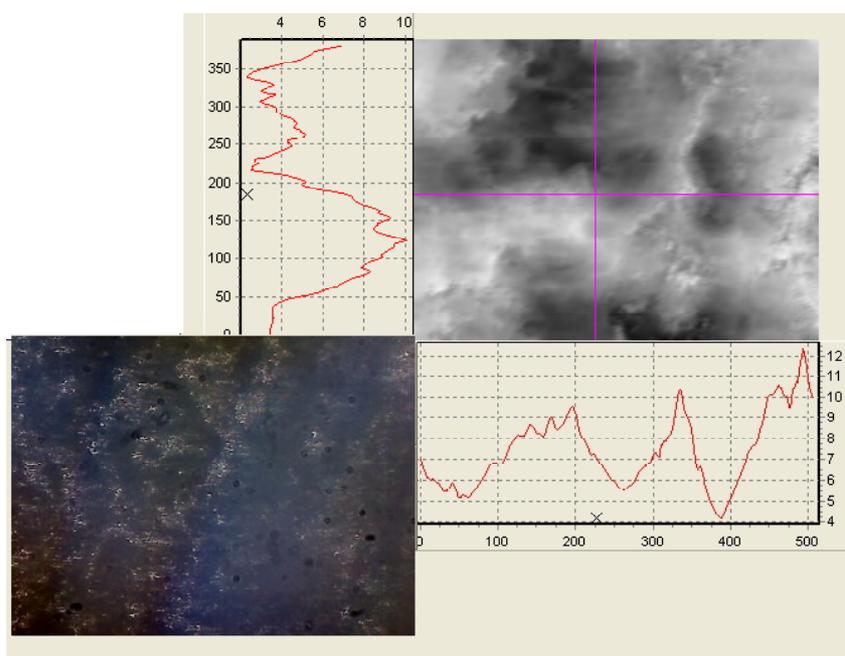
**Рис. 6.** Топография поверхности образца после износа с двумерным нагружением при отрицательных температурах: *a* – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; *б* – 3D модель поверхности

дается неравномерностью износа по поверхности. Можно предположить, что при износе происходит выкрашивание твердых частиц и пластическое деформирование мягких составляющих. В итоге, независимо от рассмотренных видов динамического нагружения при трении на поверхности образцов образуется равновесная шероховатость без явных продольных рисок и не существенным отличием значений продольной шероховатости, что наглядно можно увидеть на 3D моделях поверхностей (рис. 5, б; 6, б и 7, б).

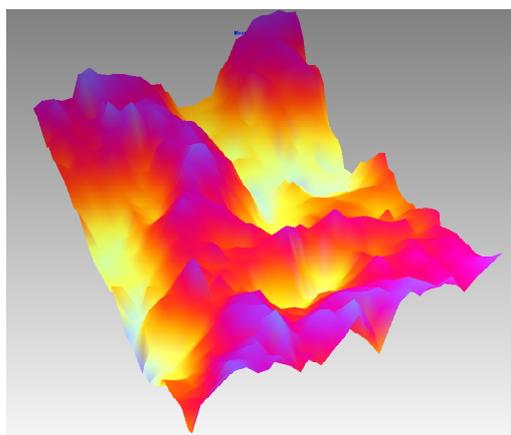
Однако, значения шероховатости поверхности в поперечном направлении образца указывают

на повышение однородности микрогеометрии поверхности при трении с увеличением сложности динамического нагружения. Так, трение с одномерным нагружением сопровождается поперечной равновесной шероховатостью с  $Rz = 3,599$  мкм;  $Ra = 1,702$  мкм, двумерным и трехмерным нагружением – соответственно  $Rz = 3,005$  мкм;  $Ra = 1,125$  мкм и  $Rz = 2,423$  мкм;  $Ra = 1,039$  мкм.

Подобная взаимосвязь топографии поверхности и структурного состояния поверхностного слоя образцов сплава ХТН-61 после трения в условиях двумерного и трехмерного нагружения отмечена и при нормальной температуре [10].



а



б

**Рис. 7.** Топография поверхности образца после износа с одномерным нагружением при отрицательных температурах: а – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; б – 3D модель поверхности

**Выводы**

Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что для оценки износостойкости трибосопряжений из сплава ХТН-61 при сложном нагружении и отрицательных температурах необходимо использование комплексного подхода определения взаимосвязи триботехнических и структурных свойств контактирующих материалов при различных видах нагружения. При этом пластически-деструктивный характер поведения металла при трении должен рассматриваться как физико-химический, т.е. процесс который сопровождается комплексом структурных, физических и физико-химических изменений поверхностного слоя деформируемого металла.

Сложный нестационарный характер нагружения при отрицательных температурах приводит к специфическому напряженному состоянию поверхностных слоев материалов трибосопряжения, что отражается на его износостойкости. Сформированная в процессе трения дисперсная структура выполняет функцию диссипативной структуры в рамках синергетического подхода, которая самоорганизуется в условиях сложного динамического контактирования с получением оптимального по износостойкости состояния. Отрицательная температура зоны контакта, изменение характера нагружения приводит к трансформации состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения. Повышение износостойкости сплава ХТН-61 возможно корректировкой его химического состава, а также созданием оптимальных условий нагружения с учетом температуры и состава окружающей среды.

**Список литературы**

1. Шпилев К. М. Самолет и природно-климатические условия / К. М. Шпилев, А. Б. Круглов. — М. : Мин. обороны СССР. 1972. — 176 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М. : Машиностроение, 1977. — 526 с.
3. Проблема долговечности металлов при низких температурах / [Б. И. Веркин, И. М. Любарский, Н. М. Гринберг, Л. Ф. Яковенко] // Космич. исслед. на Украине, 1973. — Вып. 1. — С. 14–22.
4. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах / [В. А. Стрижало, Н. В. Филин, Б. А. Куранов и др.]. — К. : Наукова думка, 1988. — 240 с.
5. Сафонов А. Прямоугольные электрические соединители. Фреттинг-коррозия в электрических контактах / А. Сафонов, Л. Сафонов // Технологии в электронной промышленности. — 2009. — № 3. — С. 48–54.

6. Филоненко С. Н. Особенности низкотемпературного точения труднообрабатываемых материалов / С. Н. Филоненко, П. Т. Слободяник // Современная обработка металлов и неметаллов резанием: материалы семинара. — М., 1973. — С. 42–46.
7. Тарасов Г. Ф. Термическая обработка сталей как фактор повышения их износостойкости при низких температурах / Г. Ф. Тарасов, А. И. Горбуля // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М. Ф. Решетнева. — 2005. — № 3. — С. 253–257.
8. Алексеев Ю. Н. К вопросу о влиянии мгновенного изменения нормального давления на величину силы контактного трения / Ю. Н. Алексеев, Г. В. Гонский, Д. Л. Лучика // Самолетостроение и техника воздушного флота. — 1972. — Вып. 29. — С. 99–104.
9. Gaylord E. W. Coefficient of static friction under static and dynamic applied loads / E. W. Gaylord., H. Shu // Wear. — 1961, 4. — N 5. — P. 401–412.
10. Ившенко Л. И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения / Л. И. Ившенко, В. В. Цыганов, И. М. Закиев // Трение и износ. — 2011. — Т. 32. — № 1. — С. 500–509.
11. Запорожец В. В. Выбор критериев и синтез алгоритма оценки видов изнашивания / В. В. Запорожец, В. А. Бердинских, В. В. Варюхно // Трение и износ. — 1988. — Т. 9. — № 6. — С. 975–984.
12. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. — 1980. — Т. 1. — № 4. — С. 622–638.
13. Игнатович С. Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев, Д. И. Борисов // Проблемы прочности. — 2006. — № 4. — С. 132–139.
14. Протасов Б. В. Явление оптимизации поверхностей трения / Б. В. Протасов : сб. научн. тр. // Надежность приборов точной механики. — Саратов : СПИ, 1972. — Вып. 55. — 24 с.
15. Игнатович С. Р. Контроль качества поверхности с использованием интерференционного профилометра / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев // Винахідник і раціоналізатор. — 2007. — № 6. — С. 8–11.

*Поступила в редакцию 17.10.2012*

**Івшенко Л.Й., Циганов В.В., Качан О.Я. Зносостійкість сплаву ХТН-61 при негативних температурах і складному динамічному навантаженні**

*Розглянуто зносостійкість сплаву ХТН-61 при терті в умовах складного динамічного навантаження і негативних температур. Показано можливість визначення інтенсивності зношування сплаву з урахуванням особливостей формування поверхневого шару при контактуванні. На підставі оцінки зміни міцностних і деформаційних властивостей поверхні зразків відмічено взаємозв'язок стану поверхневого шару і зносостійкості контактуючих поверхонь.*

**Ключові слова:** знос, зносостійкість, поверхневий шар, сплав ХТН-61.

**Ivschenko L., Tsyganov V., Kachan A. Wear-resistance of XTH-61 alloy at negative temperatures and combined dynamic loading**

*Wear-resistance of XTH-61 alloy was analyzed at friction in combined dynamic loading conditions at negative temperatures. Shown in the paper is possibility of determining the intensity of alloy wear in view of particular features of surface layer formation upon contact. Based on the assessment of change in strength and deformation properties of samples surface, the correlation between the state of surface layer and wear resistance of contact surfaces is shown.*

**Key words:** wear, wear resistance, surface layer, XTH-61 alloy.